

**А. В. СЕМИКОВ, В. В. ВОИНОВ**

## К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Получена зависимость требуемых параметров тягового электродвигателя постоянного тока и асинхронного (номинальная мощность и произведение перегрузочной способности по моменту на диапазон регулирования скорости во второй зоне при уменьшении потока) в статических режимах от заданных условий движения и параметров электромобиля (максимальные скорость и уклон дороги, коэффициент трения, проскальзывания колёс и аэродинамического сопротивления). Также для динамических режимов получена зависимость номинальной мощности двигателя постоянного тока от параметров электромобиля, необходимая для его работы без перегрева в 5-ти стандартных циклах (NEDC, AUDC, FTP72, J1015 и JC08).

**Ключевые слова:** электромобиль, электропривод, статическая механическая характеристика, эквивалентная нагрузка.

**О. В. СЕМИКОВ, В. В. ВОИНОВ**

## ДО ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Отримано залежність необхідних параметрів тягового електродвигуна постійного струму й асинхронного (номінальна потужність і добуток перевантажувальної здатності по моменту на діапазон регулювання швидкості в другій зоні при зменшенні потоку) в статичних режимах від заданих умов руху і параметрів електромобіля (максимальні швидкість і ухил дороги, коефіцієнт тертя, проковзування коліс і аеродинамічного опору). Також для динамічних режимів отримана залежність номінальної потужності двигуна постійного струму від параметрів електромобіля, необхідна для роботи електродвигуна без перегріву в 5-ти стандартних циклах (NEDC, AUDC, FTP72, J1015 та JC08).

**Ключові слова:** електромобіль, електропривод, статична механічна характеристика, еквівалентне навантаження.

**A. V. SEMIKOV, V. V. VOINOV**

## TO SELECT PARAMETERS OF ELECTRIC VEHICLE ELECTRIC MOTOR

The dependence of the required parameters of the traction direct current and induction electric motor (nominal power and production of torque overload on the velocity range in the second zone by reducing the field) in static modes on the specified driving conditions and parameters of the electric vehicle (maximum speed and slope of the road, coefficient of friction, wheel slip and aerodynamic drag) are obtained. Also for dynamic modes, the dependence of the direct current motor nominal power on the parameters of the electric vehicle, necessary for the motor to operate without overheating in 5 standard cycles (NEDC, AUDC, FTP72, J1015 and JC08) are obtained. Static power at maximum speed of the cycles with large velocity control range in the second zone within velocities at FTP72, NEDC, J1015 and JC08 cycles is sufficient for movement without overheating taking into account dynamic modes, but for small ranges and at the UADC cycle dynamic forces must be taken into account increasing the equivalent motor current.

**Keywords:** electric vehicle, electric drive, static mechanical characteristic, equivalent load.

**Введение.** В настоящее время многие автопроизводители увеличивают количество выпускаемых электромобилей, а некоторые уже определили сроки полного перехода на их выпуск [1]. Также в Украине одни из наибольших относительных темпов увеличения числа электромобилей в Европе [2]. В связи с этим на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» была открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и на базе автомобиля Ланос создан 1-ый в Украине лабораторный образец электропривода (ЭП) электромобиля, обеспечивающий в тормозных режимах возврат энергии в суперконденсаторную батарею с последующим её использованием [3].

**Целью** работы является установление соотношений для расчёта мощности тягового электродвигателя (ЭД), его перегрузочной способности и диапазона регулирования скорости во 2-ой зоне в статических (при заданных максимальных скорости  $V_{\max}$  продолжительного движения электромобиля и угла  $\alpha_{\max}$  наклона дороги при кратковременном движении, так как они являются одними из основных задаваемых параметров электромобиля [4]) и динамических режимов движения в стандартных циклах без перегрева.

Создание тягового ЭП рассматривается в [4], но там не приводятся соответствующие расчётные зави-

симости. Для электромобиля важным технологическим параметром является его линейная скорость  $V$ , определяющая силу  $F$ , противодействующую движению, включающую динамическую составляющую  $mdV/dt$  и статические: аэродинамическое сопротивление воздуха  $C_x \rho_v S_{\text{л.с.}} V^2/2 \operatorname{sgn} V$ , продольную составляющую сила тяжести  $mg \sin \alpha$  [4] и силу трения качения  $\mu_0(1+C_\mu V) mg \cos \alpha$  [5]:

$$F = m \frac{dV}{dt} + \mu_0(1+C_\mu V) mg \cos \alpha \operatorname{sgn} V + mg \sin \alpha + C_x \rho_v S_{\text{л.с.}} V^2/2 \operatorname{sgn} V, \quad (1)$$

где  $m$  – масса электромобиля;

$\mu_0(1+C_\mu V)$  – коэффициент трения качения колёс о дорогу, зависящий от скорости;

$\alpha$  – угол наклона дороги (положительное значение соответствует движению вверх);

$C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$\rho_v$  – плотность воздуха;

$S_{\text{л.с.}}$  – площадь лобового сопротивления.

Учитывая пропорциональное влияние массы электромобиля на силу в большинстве слагаемых зависимости (1), с целью универсализации при получении расчётных соотношений применены величины

удельные по массе электромобиля (т.е. отнесённые к ней), введён коэффициент:

$$k_r = C_x \rho_B S_{\text{л.с.}} / (2m) \quad (2)$$

и получено выражение удельной силы при  $V > 0$

$$F^* = \frac{F}{m} = \frac{dV}{dt} + g \cos \alpha (\mu_0 (1 + C_{\mu} V) + \text{tg} \alpha) + k_r V^2. \quad (3)$$

Графическая зависимость статической составляющей от скорости показана на рис. 1 при различных уклонах дороги ( $\text{tg} \alpha$ ) и коэффициентах  $k_r$  для движения с резиновыми шинами по дорожке с асфальтовым покрытием ( $\mu = 0,007$  и  $C_{\mu} = 0,1$  [5]).

Из него видно, что при малых скоростях ( $V < 5$  м/с = 18 км/ч) и больших уклонах сила сопротивления движению почти не зависит от скорости. Следовательно, влиянием аэродинамического сопротивления и линейной составляющей трения качения при рассмотрении медленного движения вверх с максимальным наклоном дороги можно пренебречь, и максимальное значение удельной статической силы в соответствии с зависимостью (3) примет вид:

$$F_{\text{с.макс.}}^* = g \cos \alpha_{\text{макс}} (\mu_0 + \text{tg} \alpha_{\text{макс}}). \quad (4)$$

Учитывая радиус приведения  $\rho_{\text{тр}}$  и КПД  $\eta_{\text{тр}}$  трансмиссии, для создания этой силы требуется момент на валу ЭД:

$$M_{\text{с.макс.}} = \frac{\rho_{\text{тр}}}{\eta_{\text{тр}}} m g \cos \alpha_{\text{макс}} (\mu_0 + \text{tg} \alpha_{\text{макс}}), \quad (5)$$

который соответствует точке В на рис. 2, пересечению статических механических характеристик нагрузки (штрих-пунктирная линия) при  $\alpha_{\text{макс}}$  и ЭД (непрерывная линия) с наибольшей жёсткостью.

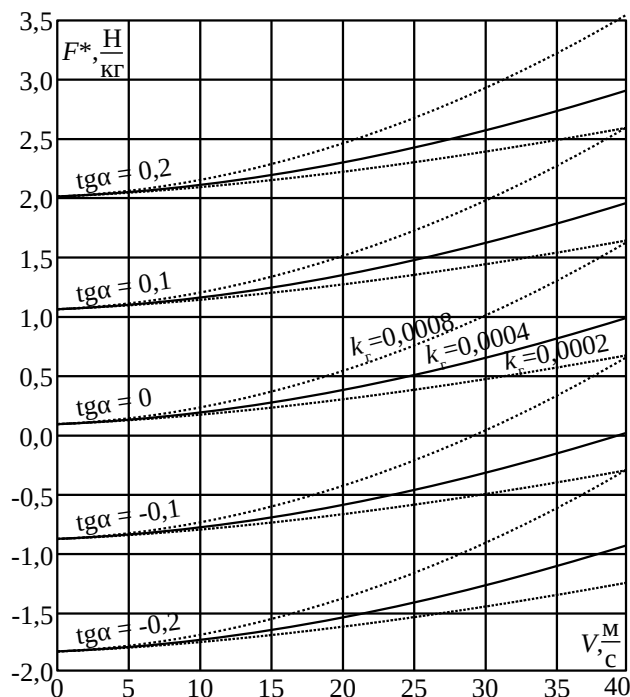


Рисунок 1 – Зависимости удельной статической силы от скорости при различных уклонах и  $k_r$

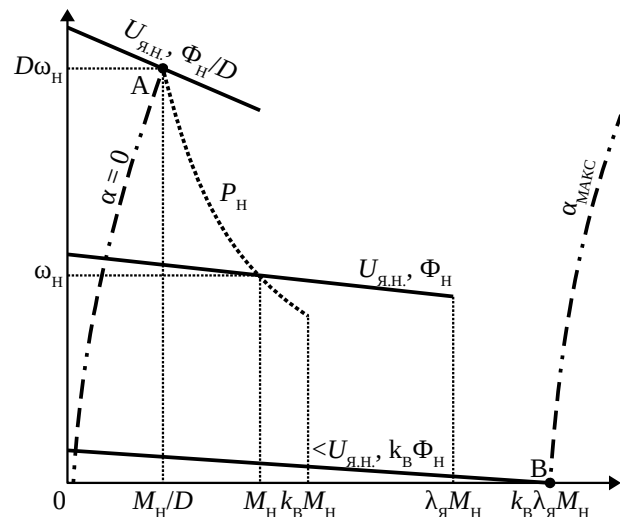


Рисунок 2 – Статические механические характеристики ЭД при различном потоке возбуждения и нагрузке при разных уклонах

При движении с большими скоростями ( $V > 10$  м/с = 36 км/ч) сила аэродинамического сопротивления и линейная составляющая трения качения существенно возрастают, и при движении по горизонтальному участку с большой скоростью ( $V > 20$  м/с = 72 км/ч) их величина в несколько раз превосходит силу сопротивления качению при малой скорости в соответствии с выражением (1). При движении под уклон ( $\text{tg} \alpha < 0$ ) сила сопротивления становится отрицательной, что указывает на переход ЭД в генераторный режим с рекуперацией энергии в накопители.

Однако при небольших уклонах ( $0 > \text{tg} \alpha > -0,1$ ) и движении с большой скоростью ( $V > 30$  м/с = 108 км/ч) аэродинамическое сопротивление и трение качения существенно уменьшают абсолютное значение статической силы, и, как следствие, мощность, которая могла бы быть рекуперирована для последующего использования в двигательном режиме. Это означает, что при движении под уклон, выбирая скорость движения, водитель электромобиля должен учитывать этот фактор, принимая во внимание наличный ресурс аккумуляторной батареи, расстояние до цели поездки и необходимость замедления либо остановки с применением механической системы торможения.

Для движения с максимальной заданной скоростью по горизонтальной дороге ЭП должен создавать силу, удельное значение которой в соответствии с зависимостью (3) равно:

$$F_{\text{с. V}_{\text{макс}}}^* = \mu_0 g (1 + C_{\mu} V_{\text{макс}}) + k_r V_{\text{макс}}^2, \quad (6)$$

соответственно ЭД должен развивать момент:

$$M_{V_{\text{макс}}} = \frac{\rho_{\text{тр}}}{\eta_{\text{тр}}} m (g \mu_0 (1 + C_{\mu} V_{\text{макс}}) + k_r V_{\text{макс}}^2), \quad (7)$$

который соответствует точке А на рис. 2, пересечению статических механических характеристик нагрузки при  $\alpha = 0$  и ЭД с максимальной скоростью холостого хода. Для используемой машины постоянного тока

(МПТ) в созданном на кафедре электромобиле [3] предполагается принудительное охлаждение, обеспечивающее независимость допустимых продолжительных потерь в двигателе от скорости его вращения. Если использовать МПТ с независимым возбуждением (например ЭД МЕ1002 для электромобилей [6]), то ЭД может обеспечивать номинальную механическую мощность  $P_n$  в диапазоне  $D$  скоростей от номинальной  $\omega_n$  до максимальной  $D\omega_n$  во 2-ой зоне регулирования при уменьшении потока возбуждения в  $D$  раз и сохранении напряжения якоря, что показано пунктирной линией  $P_n$  на рис. 2. Соответственно допустимый продолжительный момент ЭД на максимальной скорости составляет:

$$M_{\omega_{\max}} = M_n / D, \quad (8)$$

где  $M_n$  – номинальный момент ЭД.

Асинхронные машины (АМ) также обеспечивают номинальную механическую мощность в продолжительных режимах при номинальном действующем значении питающего напряжения и увеличении его частоты больше номинального в диапазоне скоростей, ограниченном перегрузочной способностью АМ по моменту [7].

МПТ обладает кратковременной перегрузочной способностью по току якоря  $\lambda_a$  и по току возбуждения, позволяющая увеличивать поток возбуждения больше номинального в  $k_b$  раз, обеспечивая перегрузочную способность по моменту  $\lambda_m = k_b \lambda_a$ , соответственно максимальный момент на валу составляет:

$$M_{\max} = \lambda_m M_n. \quad (9)$$

Также АМ имеют перегрузочную способность  $\lambda_m$ , ограниченную критическим моментом, зависящим от параметров цепей АМ в отличие от МПТ, в которых момент ограничен допустимым током.

Для обеспечения кратковременного движения с максимальным уклоном (точка В, рис. 2) приравнено (5) к (9) и для обеспечения продолжительного движения с максимальной скоростью (точка А, рис. 2) приравнено (7) к (8), в результате получена зависимость произведения коэффициента перегрузочной способности по моменту на требуемый диапазон регулирования скорости ЭД во 2-й зоне от заданных характеристик электромобиля и условий движения:

$$\lambda_m D = \frac{g(\mu_0 + tg \alpha_{\max}) \cos \alpha_{\max}}{g\mu_0(1 + C_{\mu} V_{\max}) + k_r V_{\max}^2}. \quad (10)$$

Эта зависимость отображена на рисунке 3 при различных уклонах дороги ( $tg \alpha_{\max}$ ) и коэффициентах  $k_r$  для резиновых шин и асфальта ( $\mu = 0,007$  и  $C_{\mu} = 0,1$  [5]). На нём видно увеличение требуемого диапазона или перегрузочной способности при увеличении максимального уклона дороги, что объясняется увеличением требуемого максимального момента на колёсах на малой скорости без изменения момента на максимальной скорости на горизонтальной дороге. Графики также показывают уменьшение требуемого диапазона при увеличении  $k_r$  и/или заданной максимальной скорости, что объясняется увеличением момента на колё-

сах при максимальной скорости на горизонтальной дороге без изменения момента при малой скорости на наклонной дороге.

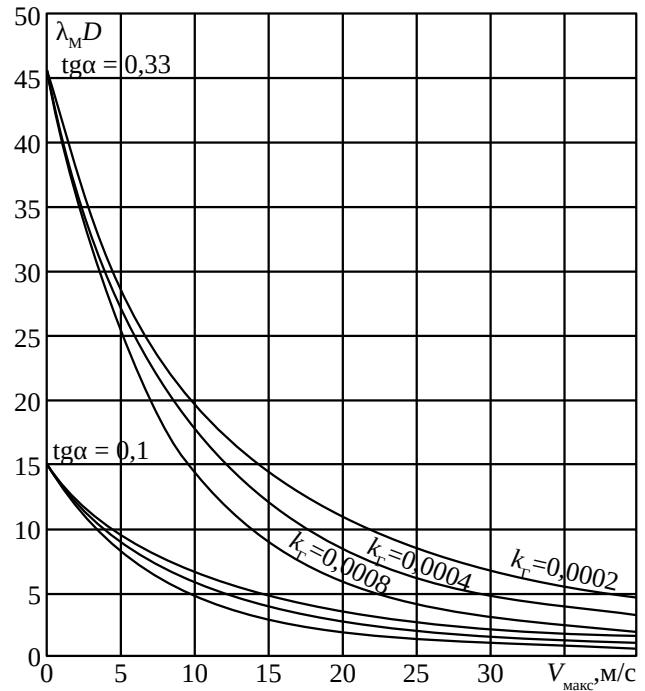


Рисунок 3 – Зависимость произведения перегрузочной способности по моменту на диапазон регулирования от скорости при различных уклонах и  $k_r$

Создание тягового усилия колёсами сопровождается их проскальзыванием относительно дороги, и скольжение почти пропорционально тяговому усилию при его значениях существенно меньше максимального [8], соответственно скорость вала ЭД будет:

$$\omega = \frac{V}{r_{\text{тр}}} (1 + C_{\omega} F^*), \quad (11)$$

где  $C_{\omega}$  – коэффициент влияния силы тяги на проскальзывание, принятый постоянным в рассматриваемых режимах движения с силой  $F^* < 0,5g$  и по сухой дороге с коэффициентом сцепления около 1.

Соответственно, при заданной максимальной скорости электромобиля с учётом (3) скорость вала ЭД составит:

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{r_{\text{тр}}} \left( 1 + C_{\omega} \left( \mu_0 (1 + C_{\mu} V_{\max}) g + k_r V_{\max}^2 \right) \right), \quad (12)$$

и на его валу должна создаваться мощность:

$$P_n^* = \left( 1 + C_{\omega} \left( \mu_0 (1 + C_{\mu} V_{\max}) g + k_r V_{\max}^2 \right) \right) \cdot \frac{V_{\max}}{\eta_{\text{тр}}} \left( \mu_0 (1 + C_{\mu} V_{\max}) g + k_r V_{\max}^2 \right), \quad (13)$$

значение которой ограничивает минимальную номинальную мощность ЭД из условия продолжительного движения без его перегрева на этой скорости. Значения этой мощности в зависимости от  $k_r$  для асфальта и резиновых шин ( $C_{\omega} = 0,003$  [7],  $\mu = 0,007$  и  $C_{\mu} = 0,1$ ) показаны пунктирными линиями на рис.4 при скоростях 25,35 м/с, 25 м/с, 16,03 м/с, 19,44 м/с и 22,67 м/с, являющимися максимальными в стандартных циклах

US federal test procedure FTP72, New European driving cycle for low power vehicles (NEDC), Urban artemis driving cycle (UADC), Japan 10-15 Mode (J1015) и JC08 соответственно [9].

Выше приведен расчёт мощности для статических режимов, в котором не учитываются динамические моменты, возникающие в реальных условиях движения, сопровождающегося в городах частыми разгонами и торможениями, что вызовет увеличение токов и, следовательно, потерь, требуя большую номинальную мощность ЭД по сравнению с рассчитанной для статических режимов движения. Эквивалентные потери в якоре МПТ предполагаются пропорциональными среднеквадратичному току якоря за цикл работы с периодом  $T$  при условии его продолжительности меньше постоянной времени нагрева двигателя, что выполняется для рассматриваемых циклов (J1015, JC08, FTP72, NEDC и UADC). Соответственно, предлагается использовать метод эквивалентного тока:

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_a^2 dt}, \quad (14)$$

где  $I_a$  – мгновенное значение тока якоря:

$$I_a = \frac{M}{k\Phi}, \quad (15)$$

где  $M$  – мгновенное значение момента ЭД;

$k\Phi$  – конструктивный коэффициент и магнитный поток, равный номинальному  $\Phi_n$  при скорости вала ЭД меньше номинальной  $\omega_n$ , а при большей скорости уменьшающийся пропорционально ей:

$$\Phi = \begin{cases} \Phi_n & \text{при } \omega \leq \omega_n \\ \frac{\omega}{\omega_n} \Phi_n & \text{при } \omega \geq \omega_n \end{cases},$$

что для компактности следующих выражений можно записать с использованием функции знака:

$$k\Phi = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{\frac{1+\operatorname{sgn}(\omega-\omega_n)}{2}} k\Phi_n. \quad (16)$$

Введя эквивалентный момент  $M_3 = k\Phi_n I_3$ , чтобы ему соответствовала необходимая номинальная мощность ЭД:

$$P_n = M_3 \omega_n, \quad (17)$$

с учётом соотношений (14)...(16) получена зависимость:

$$M_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^{\frac{1+\operatorname{sgn}(\omega-\omega_n)}{2}} M \right)^2 dt}, \quad (18)$$

в которой момент на валу ЭД определяется силой  $F$ , действующей против движения электромобиля, с учётом  $\rho_{\text{тр}}$  и  $\eta_{\text{тр}}$  равный:

$$M(t) = \begin{cases} \frac{\rho_{\text{тр}} F}{\eta_{\text{тр}}} & \text{при } FV \geq 0, \\ \eta_{\text{тр}} \rho_{\text{тр}} F & \text{при } FV \leq 0 \end{cases},$$

что для компактности следующих выражений с ис-

пользованием функции знака и, учитывая рассмотрение однонаправленного движения  $V \geq 0$ , можно записать в виде:

$$M = \eta_{\text{тр}}^{-\operatorname{sgn} F} \rho_{\text{тр}} F. \quad (19)$$

Для перехода от вращательных величин к поступательным введена удельная эквивалентная сила  $F_3^* = M_3 / (\rho_{\text{тр}} m)$ , чтобы ей соответствовала требуемая удельная номинальная мощность ЭД, равная с учётом (11) и (17):

$$P_n^* = \frac{P_n}{m} = F_3^* V_n (1 + C_\omega F_{c.V_{\text{max}}}^*), \quad (20)$$

и с учётом соотношения (18) получена зависимость удельной эквивалентной силы:

$$F_3^* = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \left( \frac{V(1+C_\omega F^*)}{V_n} \right)^{\frac{1+\operatorname{sgn}(V(1+C_\omega F^*)-V_n)}{2}} \eta_{\text{тр}}^{-\operatorname{sgn} F^*} F^* \right)^2 dt}.$$

Движение в стандартных циклах возможно разделить на  $n$  участков в интервалах времени от  $t_i$  до  $t_{i+1}$  с начальными скоростями  $V_i$  и с постоянными ускорениями  $a_i$  на каждом участке, при этом удельная эквивалентная сила  $F_{\text{экв},i}^*$  на  $i$ -ом участке составит:

$$F_{3i}^* = \sqrt{\left( \frac{V(1+C_\omega F^*)}{V_n} \right)^{\frac{1+\operatorname{sgn}(V(1+C_\omega F^*)-V_n)}{2}} \eta_{\text{тр}}^{-2\operatorname{sgn} F_i^*} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{i+1}-t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (F_i^*(t))^2 dt}}.$$

Тахограммы скорости для рассчитываемых циклов представлены временными интервалами по 1 с [9], соответственно эквивалентная удельная сила на всём цикле составит:

$$F_{3\text{ц}}^* = \sqrt{\frac{1}{t_n-t_1} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{V(1+C_\omega F^*)}{V_n} \right)^{\frac{1+\operatorname{sgn}(V(1+C_\omega F^*)-V_n)}{2}} \cdot \eta_{\text{тр}}^{-2\operatorname{sgn} F_i^*} \int_{t_i}^{t_{i+1}} F_i^{*2} dt \right)}. \quad (21)$$

При движении по асфальту с резиновыми шинами ( $C_\omega = 0,003$ ,  $\mu = 0,007$  и  $C_\mu = 0,1$ ), что соответствует рассмотрению движения в городских условиях, получены решения соотношения (21) для циклов FTP72, NEDC, UADC, J1015 и JC08, с отношением максимальной скорости  $V_{\text{ц}}$  в каждом цикле к соответствующей номинальной скорости ЭД

$$D_{\text{ц}} = \begin{cases} \frac{V_{\text{ц}}}{V_n} & \text{при } \frac{V_{\text{ц}}}{V_n} \geq 1 \\ 1 & \text{при } \frac{V_{\text{ц}}}{V_n} \leq 1 \end{cases}.$$

Среди рассмотренных циклов наибольшие значения удельной эквивалентной силы при движении в UADC, соответственно приведено выражение для его расчёта:

$$F_{UADC}^* = \sqrt{0,269 \frac{V_{ц}^2}{V_{н}^2} - 0,624 \frac{V_{ц}}{V_{н}} + 2,29 + k_r \left( 21,8 \frac{V_{ц}^2}{V_{н}^2} - 33,7 \frac{V_{ц}}{V_{н}} - 4,42 \right)} \cdot \sqrt{\left( 2480 \eta_{тр}^2 + \frac{7158}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2 + \left( -26,2 \eta_{тр}^2 + \frac{46,3}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + 0,285 \eta_{тр}^2 + \frac{0,376}{\eta_{тр}^2}},$$

в котором 2-й сомножитель является точным решением (с округлением чисел до 3-х значащих цифр) при  $D_{ц} = 1,5$ , а 1-й сомножитель – приближенный коэффициент, учитывающий влияние  $D_{ц}$  в зависимости от  $k_r$ .

С учётом выражения (18) для тех же условий движения и при номинальной скорости МПТ, соответствующей линейной скорости в 2 раза меньше максимальной скорости в цикле ( $D_{ц} = 2$ ), получены значения необходимой удельной номинальной мощности ЭД во всех 5-ти рассмотренных циклах:

$$P_{FTP72}^* = \sqrt{27,4 \eta_{тр}^2 + \frac{43,1}{\eta_{тр}^2} + \left( -3834 \eta_{тр}^2 + \frac{19063}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + \left( 1,06 \cdot 10^6 \eta_{тр}^2 + \frac{14,4 \cdot 10^6}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2},$$

$$P_{NEDC}^* = \sqrt{13,2 \eta_{тр}^2 + \frac{25,8}{\eta_{тр}^2} + \left( -4078 \eta_{тр}^2 + \frac{28670}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + \left( 1,19 \cdot 10^6 \eta_{тр}^2 + \frac{26,1 \cdot 10^6}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2},$$

$$P_{UADC}^* = \sqrt{20,8 \eta_{тр}^2 + \frac{27,6}{\eta_{тр}^2} + \left( -2243 \eta_{тр}^2 + \frac{4059}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + \left( 0,227 \cdot 10^6 \eta_{тр}^2 + \frac{0,665 \cdot 10^6}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2},$$

$$P_{J1015}^* = \sqrt{7,223 \eta_{тр}^2 + \frac{16,8}{\eta_{тр}^2} + \left( -2902 \eta_{тр}^2 + \frac{8876}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + \left( 0,867 \cdot 10^6 \eta_{тр}^2 + \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2},$$

$$P_{JC-08}^* = \sqrt{9,93 \eta_{тр}^2 + \frac{23,8}{\eta_{тр}^2} + \left( -3217 \eta_{тр}^2 + \frac{11524}{\eta_{тр}^2} \right) k_r + \left( 0,874 \cdot 10^6 \eta_{тр}^2 + \frac{5,99 \cdot 10^6}{\eta_{тр}^2} \right) k_r^2}.$$

Соответствующие зависимости при  $\eta_{тр} = 92\%$  (для трансмиссии состоящей из дифференциала и карданов) отображены на рис. 4 штрихпунктирными линиями. Для случая равенства или превышения номинальной скорости ЭП максимальной скорости в цикле

( $D_{ц} = 1$ ) также получены значения мощности и отображены на рис. 4 непрерывными линиями.

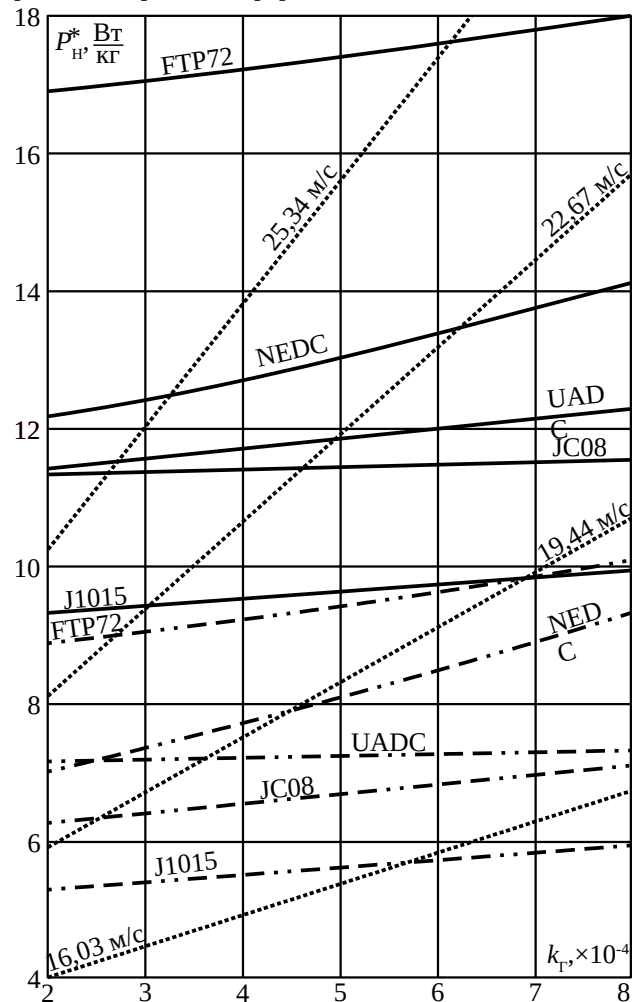


Рисунок 4 – Зависимость удельной мощности от  $k_r$  для 5-ти стандартных циклов и в статических режимах при постоянной скорости, максимальной в этих циклах

**Выводы.** Получены расчётные выражения эквивалентной силы для циклов, позволяющие выбрать минимально необходимую мощность МПТ из условий нагрева с учётом регулирования скорости во 2-ой зоне уменьшением магнитного потока. В случае номинальной скорости МПТ в 2 раза меньше, чем при максимальной скорости, ( $D_{ц} = 2$ ) в большинстве циклов (кроме UADC с максимальной 16,03 м/с = 57,7 км/ч) требуемая номинальная мощность МПТ меньше, чем статическая мощность при максимальной скорости в цикле, что видно на рис. 4. Но при уменьшении диапазона регулирования скорости во 2-ой зоне необходимая мощность увеличивается, становясь больше статической, несмотря на уменьшение эквивалентной силы, исключая большие значения  $k_r$  и цикл NEDC из-за аэродинамической составляющей силы сопротивления. Соответственно выбор ЭД по статическому режиму становится недопустим, особенно при использовании МПТ с постоянными магнитами, у которых номинальная скорость должна быть не меньше максимальной в цикле ( $V_{ц} / V_{н} \leq 1$ ). Значения удельной мощности для циклов лежат в диапазоне от 5 Вт/кг (для

цикла J1015 при  $V_{\text{ц}} / V_{\text{н}} \geq 2$  и  $k_{\text{г}} \leq 0,0002$ ) до 18 Вт/кг (для цикла FTP72 при  $V_{\text{ц}} / V_{\text{н}} \leq 1$  и  $k_{\text{г}} = 0,0008$ ), следовательно достаточно ЭД массой 1...4% от массы всего электромобиля при удельных по массе ЭД мощностях до 0,5...1 кВт/кг и более у серийно выпускаемых МПТ [6] и АМ [10].

Для МПТ и АМ также получены расчётные зависимости произведения перегрузочной способности по моменту на диапазон регулирования скорости во второй зоне при заданных максимальных скорости движения в продолжительном режиме работы ЭД и уклона дороги при движении с малой скоростью в кратковременном режиме работы. Из них следует, что для заданных больших уклонов дороги ( $\text{tg} \alpha = 0,33$ ) и максимальных скоростей ( $>25...35$  м/с) или для не больших уклонов дороги ( $\text{tg} \alpha = 0,1$ ) и не больших максимальных скоростей ( $>10...15$  м/с =  $36...54$  км/ч) достаточно перегрузочной способности по моменту и диапазона регулирования скорости во 2-й зоне в пределах 2...2,5, что соответствует серийно выпускаемым МПТ и АМ.

#### Список литературы

1. С 2020 года Smart будет выпускать только электромобили. URL: <https://elmobil.ru/c-2020-goda-smart-budet-vypuskat-tolko- elektromobili>. (дата обращения 13.05. 2019).
2. В Европе новых электромобилей зарегистрировано почти 150 000 единиц в 2017 году. URL: <http://hev cars.com.ua/reviews/top- elektromobiley-i-evropeyskih-stran-po-rostu-prodazh-v-2017-godu>. (дата обращения 13.05.2019).
3. Клепиков В. Б., Семиков А. В., Моисеев А. Н., Гончар А. С. и др. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, Вип. 112 (1121). С. 195-198.
4. John M. Miller. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2011. 608 p.
5. José C. Páscoa etc. An innovative experimental on-road testing method and its demonstration on a prototype vehicle, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012. Vol. 26, № 6. pp.1663–1670.
6. Motenergy Brush-Type DC Motors. URL: <http://www.motenergy.com/brdcmo.html>. (дата обращения 13.05.2019).
7. Коробко А. В. Управление асинхронным двигателем при постоянной мощности. *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. Ульяновск: УлГТУ, 2008, Вып. 4. С. 58–59.

8. Muller S., Uchanski M., Hedrick K. Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2013. Vol. 125, №4. pp. 607–617.
9. Worldwide engine and vehicle test cycles. URL: <http://www.dieselnet.com/standards>. (дата обращения 13.05.2019).
10. *Электродвигатели "Орион-18"*. URL: <http://www.orionmotor.narod.ru/trans.htm>. (дата обращения: 13.05.2019).

#### References (transliterated)

1. S 2020 goda Smart budet vyipuskat tolko elektromobili [From 2020, Smart will only produce electric cars]. URL: <https://elmobil.ru/c-2020-goda-smart-budet-vypuskat-tolko- elektromobili>. (accessed 13.05.2019).
2. V Evrope novyih elektromobiley zaregistrovano pochtii 150 000 edinit v 2017 godu [In Europe, new electric vehicles registered almost 150,000 units in 2017]. URL: <http://hev cars.com.ua/reviews/top- elektromobiley-i-evropeyskih-stran-po-rostu-prodazh-v-2017-godu/>. (accessed 13.05.2019).
3. Klepikov V. B., Semikov A. V., Moiseev A. N., Gonchar A. S. i dr. Iz opyta sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [From the experience of creating electric drive electric vehicle with a super capacitor energy storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI» 2015, Vyp. 112 (1121). pp. 195-198.
4. John M. Miller. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2011. 608 p.
5. José C. Páscoa etc. An innovative experimental on-road testing method and its demonstration on a prototype vehicle, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012, vol.26, №6. pp.1663–1670.
6. Motenergy Brush-Type DC Motors. URL: <http://www.motenergy.com/brdcmo.html>. (accessed 13.05.2019).
7. Korobko A. V. Upravlenie asinhronnym dvigatelem pri postoyan- noy moschnosti [Control of asynchronous motor at constant power]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer- siteta* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. Ulyanovsk: UGTU 2008, Vyp. 4. pp. 58–59.
8. Muller S., Uchanski M., Hedrick K. Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2013. vol. 125, №4. pp. 607–617.
9. Worldwide engine and vehicle test cycles. URL: <http://www.dieselnet.com/standards>. (accessed 13.05.2019).
10. *Elektrodvigateli "Orion-18"* [Electric motor "Orion-18"]. URL: <http://www.orionmotor.narod.ru/trans.htm>. (accessed 13.05.2019).

Посмунула 14.06.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Семіков Олексій Володимирович (Семиков Алексей Владимирович, Semikov Oleksij Volodymyrovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: a.v.semikov@gmail.com

**Воїнов Володимир Володимирович (Войнов Володимир Владимирович, Voinov Volodymyr Volodymyrovych)** – заступник директора Навчально-наукового інституту Енергетики, електроніки та електромеханіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: vvvoinov@gmail.com